

Views & Comments

打破学科界限的整合课程学习——全球 STEM 课程的开发

Katherine Shirey

Knowles Teacher Initiative, Moorestown, NJ 08057, USA

1. 引言

“在大多数课程中, 学生被教导如何去学习知识, 而没有将知识应用到实践中, 所以记忆不会特别深刻。”Francis Reyes是费尔法克斯郡全球STEM挑战课中的一名学生, 她与成年人和专业人士围坐在一起, 解释着她的STEM(代表科学、技术、工程和数学)课程与过去她参加过的其他课程有怎样的不同。Reyes说, 不同于其他课程, “这课程很实用。”来自爱迪生高中的Pamela Brumfield是Reyes的校长, 她补充道, “如果给孩子们一个跳出固有思维思考的机会, 他们就会这么做。我们只要为他们创造机会就可以了。”[1]

为学生们提供满怀激情地学习整合性STEM课程的机会, 并且使他们学习到的科学和数学知识“变得持久”(即保持长期记忆), 这是一项艰巨的任务。通常, 专攻科学或数学的教师并不擅长工程或技术教育方面的知识, 所以跨学科的STEM教学可能会减弱STEM课程的教学效果, 例如, 当强调建造什么东西时, 科学内容接受度减小, 或者数学推理能力会被削弱。然而, 全球STEM挑战课的跨学科规划者制定了一门综合数学、科学和工程学的大课程, 在这个课程中数学和科学是解决工程挑战所必需的课程, 而这些工程挑战与美国国家工程院(NAE)的重大工程挑战项目紧密相连[2]。本文阐述了设计STEM综合课程的难点, 重点研究了科学学科与工程学科的分立以及一些文件, 这些文件说明了费尔法克斯郡全球STEM课程是如何克服典型的学科分立

并为学生提供整合性STEM课程体验的。本文不探讨“现场”课堂的制定, 而只探讨已开发的课程。

2. K-12 的 STEM 整合课程问题

工程、技术、科学和数学的整合与传统的学校各学科内容彼此独立相冲突。原因之一可能在于传统大学如何进行工程设计教学这一长期遗留的问题。“工程设计过程”指的是“一个系统的、智能化的过程, 设计者在此过程中需生成、评估并具体说明装置、系统或工艺的概念, 以满足特定的约束条件来实现客户的要求”[3]。在高度重复的过程中, 工程设计具有特定的属性, 如分析、约束、建模、优化和系统[4]以及一定的工程思维, 例如包含多种可能的解决方案[4], 吸取生产失败的经验[5], 融汇发散思维和聚合思维[6], 以及认真监控目标和子目标的进展。

传统上, 工程学是高等教育的课程, 工程设计与工程科学(如流体动力学、静电学、物理学、生物化学等)分开教授, 且后者包含大部分的工程学课程[7,8]。这一课程划分常受人诟病, 因为高等教育工程专业的学生和毕业生无法理解数学和科学课程的内容如何与工程实践和就业相联系[9]。

同时, 工程教学与科学教学的割裂也体现在K-12课程安排上。数学和科学是必修的“核心”课程, 而工程或技术教育课程是可供选择的“选修”课程。每门课的课程要求都不相同, 包括国家规定测试、教师培养和专

业发展。例如，50个州都规定只有通过数学考试中的高风险测试才可以高中毕业，但是在历史上却没有类似的对于工程设计的要求。

但是，近年来，整合性STEM学习发展势头迅猛，各种各样的STEM学习模式层出不穷，并呈现出不同整合度。广受欢迎的K-12的“项目引路”(PLTW)工程课程延续了将核心课程与选修课程分开的传统，但在学生的课程中额外增加了一门PLTW课程。此外，下一代科学标准(NGSS)[10]强调工程设计的实践与科学内容的学习应该同时进行，并认为“在课堂中进行工程(设计)实践可以帮助学生获得并应用科学知识”[11]。这是一个颠覆传统的重大转变，它要求教授K-12课程的教师同时兼顾教授设计过程和科学内容的目标。

少量研究表明，这对教师来说是很难做到的。在实践中，他们似乎很难平衡科学教学和工程设计之间的关系。有时，科学可能不是设计的核心内容[12]，而仅仅只是一系列工作计划中的一部分；有时，工程设计过程也可能被压缩。这些都会导致在解决挑战性问题的过程中出现一些不尽如人意的设计操作(如各种修改、反复试验或错误百出)[13]。另一项关于高中物理教师尝试教授整合性工程学课程的研究发现，工程设计过程中时间不充裕导致了数据收集不足，从而无法推动工程决策，这也隐含着对工程设计的不重视[14]。使用工程设计来教授科学内容意味着需要同时进行工程设计和内容教学，但上述研究中没有一项真正实现了设计和核心内容教学之间的平衡。

3. 全球 STEM 挑战愿景

2015年，费尔法克斯郡公立学校向弗吉尼亚州教育局递交了一份高中创新计划补助金申请，以便在亚历山

大的爱迪生高中开设一门新的整合性STEM课程。该课程旨在为学生提供一个基于NAE的重大工程挑战项目的STEM环境。3位教师将共同负责90名学生，每隔一天进行4.5学时的教学。这些教师分别是数学、科学和工程教育领域的专家。

全球STEM挑战课程希望学生能够达成以下3个目标：①了解在课堂上进行的工程实践；②学习新的数学和科学内容；③能够运用以前所学的数学和科学知识。学生们将会一起度过3年高中生活：在9年级，他们将会关注与食品有关的重大挑战；在10年级，他们将会聚焦于水资源挑战；在11年级，他们将会专注于能源挑战。(详情见已批准的拨款申请[15])

费尔法克斯郡公立学校与诺尔斯教育系统签约合作来协助建立STEM的教学课程。诺尔斯之所以能被选中，是因为它专门组建了一个由高中数学和科学教师组成的高级研究员小组，为数学和科学内容的工程教学制定框架，并对老师进行长达5年以上的教学技巧培训。基于之前的调查，诺尔斯教育系统的领导团队意识到课程必须平衡核心内容的获取和工程活动的参与，因而诺尔斯雇佣了一些有STEM整合经验的高级研究员，让他们与费尔法克斯郡的课程内容专家一起草拟课程。之后，为了让课程教师熟悉这些计划好的课程并建立工程设计整合的共识，诺尔斯举行了为期3天的教师研讨会。此外，每月召开的合作会议以及对学校的实地考察确保了课程能够如实开展。

3.1. 诺尔斯工程整合概念框架

共同规划的课程是在诺尔斯高级研究员所构建的相关数学与科学的工程整合概念框架(图1)基础上建立起来的。诺尔斯模型将工程设计指导概念化为一个迭代系统，由工程设计4个交叉重叠的阶段组成，包括：问

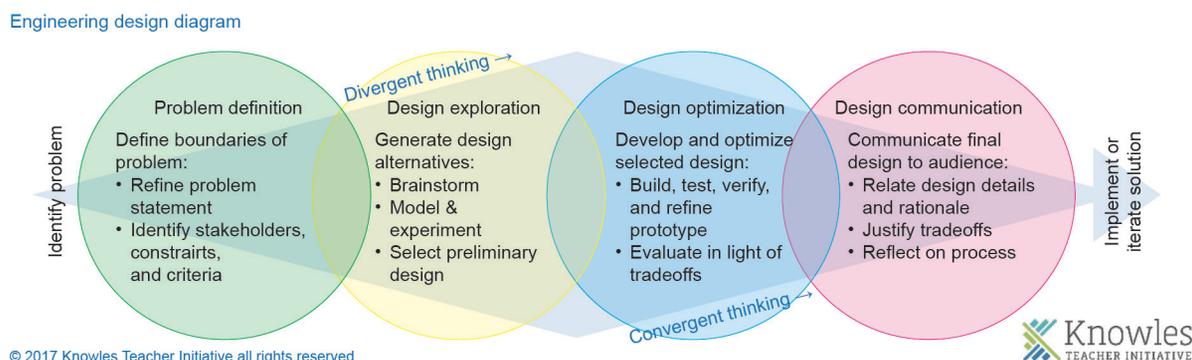


图1. 诺尔斯工程设计过程模型的4个阶段(©2017诺尔斯教育系统)。

题定义、设计探索、设计优化和设计交流。

诺尔斯模型的4个阶段包括了工程设计从发散性到收敛性的方方面面。此外，通过创造性思维、头脑风暴以及加强沟通交流，提升了与工程设计相关的软技能[16]。设计优化决策要求学生们通过可靠的科学验证过程和数学方法来做出相关的设计决定，而不是仅仅通过盲目尝试来获取成功。这个模型也旨在为课上运用到它的老师们提供框架和支持（即可能的开头和结尾以及可取的部分和关联）。

4. 方法

费尔法克斯郡教学领导不仅向诺尔斯，同时也向规划者们传达了他们的愿景，还阐释了相关国家内容标准和日常课程规划的框架。诺尔斯高级研究员和费尔法克斯郡的教师分别成对组建了6支跨学科内容教学的规划团队。受到费尔法克斯郡的启发，新生围绕着与食品相关的主题，每组挑选了一个与食品相关的挑战项目，然后从工程设计方面来构思与科学、数学和工程相关的课题，之后他们将花费大约6周时间研究这个课题。尽管他们不需要提供每次教学所需的课堂资源（如工作表或者PPT演示文稿），但他们还是需要计划好每一天。

通过几个月的线上协同努力以及对Google Docs多人同时编辑的大量使用，规划团队为他们所负责的小组提出了基本问题、每日学习目标以及每日教学计划。为了确保学生在这3年中学到国家要求的内容，诺尔斯项目人员与费尔法克斯郡的教学专家合作监督，以保证工作的顺利进行，保持规划的课程与国家标准一致。费尔法克斯郡的教学专家还协助纵向调整课程，以确保9年级新生为各个单元的学习做好准备，同时确保学生在按

顺序完成为期3年的STEM挑战课程后，做好充足准备继续进行12年级的课程学习。

5. 成果和讨论——全球 STEM 挑战课程

为本课程的新生开发的6个完整的STEM单元主要集中于以下几个设计挑战计划：

(1) 为全球STEM挑战课程独特的多教室环境设计房间。

(2) 为植物中病原体的野外鉴定设计一种便携式显微镜。

(3) 为缓解饥饿设计一种治疗性食物及其输送系统。

(4) 为培育一种特定的食物设计一个温室系统。

(5) 设计一个食品废弃物处理系统以减少食物的浪费。

(6) 为乳糖不耐症患者研制一种蛋白质。

这些课程的每一个单元至少都能与一项重大挑战项目相关联。表1列出了重大挑战项目及其组织主题，这些主题与9年级全球STEM挑战课程每个单元内容相匹配。

每个单元都是在诺尔斯4阶段工程设计过程（图1）中设计的，强调工程设计过程的各个方面。同时，这些单元以工程挑战作为全部课堂学习的动力，弥合了工程设计与核心内容课程之间的分层。这些单元通过将设计过程的顺序与能够支持它的科学和数学内容相联系，将科学、数学和工程的学习结合在一起。例如，在显微镜挑战中，学生们在科学课中了解了病原体的大小和它们在生态系统中的作用，然后通过这些知识决定他们正在设计的显微镜所必需的放大倍数。同时，学生们学习与放大率、角度和射线图中的三角形有关的几何及比率，以相应地记录他们

表1 NEA重大挑战项目和对应的全球STEM挑战课程9年级单元

Global STEM Challenges course Grade 9 unit	NAE Grand Challenge(s)	
	Grand Challenge	Grand Challenges' organizing theme
(1) Design a room plan for the unique multi-classroom setting of the Global STEM Challenges course	• Advance personal learning	• Living and learning with joy
(2) Design a portable microscope for field identification of pathogens on plant life.	• Engineering the tools of scientific discovery	• Sustaining life on Earth
(3) Design a therapeutic food and delivery system for the hungry	• Engineering better medicines • Restore and improve the urban infrastructure	• Sustaining life on Earth
(4) Design a greenhouse system to cultivate a specific food	• Manage the nitrogen cycle	• Sustaining life on Earth
(5) Design a food waste system to minimize lost food and energy	• Restore and improve the urban infrastructure	• Sustaining life on Earth
(6) Design a protein targeted at assisting individuals with lactose intolerance	• Engineering better medicines • Advance health informatics	• Sustaining life on Earth

的显微镜设计，同时学习数据分析技术以评估其设计的有效性并做出修改。在技术课上，学生学习概念验证的建模和原型制作、显微镜设计的计算机辅助绘图以及在公共海报上全面而清晰地展示创意思想的基础技能。他们在整个单元学习过程中灵活自由地组合，提高协作沟通、创造性解决问题、记录和反思的能力。他们学习将失败当作获得有效解决方案的途径，并且利用收集到的关于他们设计的数据来对其设计进行改善。

完整的教学单元内容没有公开发布，然而，表2是每个单元中科学、数学、技术和工程内容之间相互作用的简介（该表只强调了主要内容区域）。

这些单元的设计是为了让每门课程的内容都服务于学生们将要面临的工程设计挑战。内容之间的关系有时是隐性的，有时是显性的，目的是让学生致力于在设计挑战的同时，发现自己在理解上存在的不足，从而主动寻求计划中的核心内容来帮助他们设计、评估、捍卫和传达他们的设计理念。

每个单元都围绕“食物”主题展开。每个单元课程都强调生物学和几何学概念，因为它们分别是传统的9年级科学和数学的核心课程。不过，这些教学单元还将代数、三角、化学、物理学和计算机科学等方面内容结合起来，因为在挑战系统中它们是不可分离的思维方式。当学生在

综合数学链中学习传统科学时，内容学科边界会进一步模糊，例如，通过数学链引入透镜图和折射知识来解决透镜方程。跨学科内容的联系，将课程聚焦于系统单元定义的挑战上，而不是传统的学科定义。同时，每个单元都根据各州不同的学习标准划分层次，以保证其与国家和学校的要求一致。明确计划中的标准并在规划期间寻求更多的机会优化标准，有助于计划的完善。

整体而言，每年的课程学习可以看作是“螺旋式上升”或者对各内容之间反复的温习过程，有时会以新的方式探索之前的内容，而不是循序渐进地一步步继续探索新的内容。通过这种方式，课程不仅对同一内容进行多次阐释，也提出了对于该内容的新的应用方式。这种结构可能有助于缓解学生的科学、数学的学习与工程实践和就业应用之间的明显脱节现象[8]。

单元教学的成功进行与规划者的协同合作密不可分。规划者运用各自的专业知识及工程整合经验互帮互助，整体把握单元教学，发掘传统数学与科学授课中与单元教学可能相关的因素。

6. 总结

如何做到将传统上彼此独立的数学、科学与技术课

表2 全球STEM课程9年级单元和课程重点（©2017诺尔斯教育系统）

Global STEM Challenges course Grade 9 unit	Main mathematics content	Main science content	Main engineering/technology content
(1) Design a room plan for the unique multi-classroom setting of the Global STEM Challenges course	<ul style="list-style-type: none"> • Area • Composite figures • Scale • Ratios • Logic & proofs 	<ul style="list-style-type: none"> • Nature of science • Observation & inference • Scientific investigation and data representation 	Basic skills: <ul style="list-style-type: none"> • Problem definition • Criteria & constraints • Design alternatives • Technical drawing • Design process communication
(2) Design a portable microscope for field identification of pathogens on plant life	<ul style="list-style-type: none"> • Proportions • Magnification • Angles • Ray diagrams • Growth and decay functions 	<ul style="list-style-type: none"> • Macroscopic and microscopic observation • Classification of living things • Cell theory • Lenses and refraction 	Additional basic skills: <ul style="list-style-type: none"> • Stakeholders • Computer-assisted drawings • Design evaluation
(3) Design a therapeutic food and delivery system for the hungry	<ul style="list-style-type: none"> • Linear and quadratic functions and predictions • Optimization and solving systems of equations 	<ul style="list-style-type: none"> • Energy • Energy and matter in the human body • Macromolecules 	All of the basic skills above plus: <ul style="list-style-type: none"> • Propulsion • Wheel and gear ratios • Two-dimensional laser cutting • Three-dimensional modeling basics
(4) Design a greenhouse system to cultivate a specific food	<ul style="list-style-type: none"> • Rates of change • Unit conversions and ratios • Balancing ratios • Solving systems of equations • Exponential growth and logarithms • Efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Processing and cycling matter • Cell cycle • Photosynthesis • Chemical nomenclature • Stoichiometry • Cell transport • pH 	All of the basic skills above plus: <ul style="list-style-type: none"> • Elevation drawings • Woodworking skills

Global STEM Challenges course Grade 9 unit	Main mathematics content	Main science content	Main engineering/technology content
(5) Design a food waste system to minimize lost food and energy	<ul style="list-style-type: none"> • Regular & irregular volumes • Surface area & volume • Percentages & efficiency • Absolute values • Graphical representations 	<ul style="list-style-type: none"> • Climate change • Nitrogen cycle • Decomposition • Energy & carbon cycles & conservation • Respiration • Methanogenesis 	All of the basic skills above plus: <ul style="list-style-type: none"> • Three-dimensional virtual modeling
(6) Design a protein targeted at assisting individuals with lactose intolerance	<ul style="list-style-type: none"> • Analyzing data • Analytic exponential models • Solving triangles, similarity, and congruency 	<ul style="list-style-type: none"> • Cell functions • Gene expression • Genetics 	All of the basic skills above plus: <ul style="list-style-type: none"> • Three-dimensional printing • Creating an infographic and product video

题通过工程设计挑战联系起来，全球STEM挑战课程为此提供了可行的解决方案。该课程以美国国家工程院重大工程挑战项目为动力与灵感来源，提供了一种在工程设计背景下构建数学和科学学习框架的方法。课程开发得益于国家各个团体组织、课程教师以及在核心课程中教授工程整合经验的专家顾问的共同参与。规划者在标准要求下，着眼于寻找传统上独立的课程之间创造性的联系，创造了一门学校专用课程，以实现利用整合性工程挑战来教授高中数学与科学内容的目标。

Acknowledgements

The author would like to thank the National Academy of Engineering, Fairfax County Public Schools, and the Knowles Teacher Initiative for their support of this article. Financial support for the Knowles-Fairfax contract was provided by a Virginia Department of Education High School Program Innovations Planning Grant.

References

[1] King K. Alexandria students use STEM to solve some real-world problems

- [Internet]. Washington, DC: WTOP; c2017 [updated 2017 Jul 21; cited 2017 Nov 5]. Available from: <https://wtop.com/education/2017/07/alexandriastudents-stem-solve-problems/slide/6/>.
- [2] NAE Grand Challenges for Engineering Committee. NAE Grand Challenges for Engineering. Washington, DC: National Academy of Engineering; 2008.
- [3] Evans DL, McNeil BW, Beakley GC. Design in engineering education: past views of future directions. *Eng Educ* 1990;79(4):517–22.
- [4] Katehi L, Perason G, Feder MA, editors. Engineering in K-12 education: understanding the status and improving the prospects. Washington, DC: The National Academies Press; 2009.
- [5] Petroski H. To engineer is human: the role of failure in successful design. New York: Vintage Books; 1992.
- [6] Khalaf K, Balawi S, Hitt GW, Radaideh A. Engineering design education: when, what, and how. *Adv Eng Educ* 2013;3(3):1–31.
- [7] Grinter LE. Summary of the report on evaluation of engineering education. *J Eng Educ* 1955;46:25–60.
- [8] Engineering Accreditation Commission. Criteria for accrediting engineering programs: effective for reviews during the 2015–2016 accreditation cycle. Baltimore: ABET; 2014.
- [9] Froyd JE, Ohland MW. Integrated engineering curricula. *J Eng Educ* 2005;94(1):147–64.
- [10] NGSS Lead States. Next generation science standards: for states, by states. Washington, DC: The National Academies Press; 2013.
- [11] National Research Council. A framework for K-12 science education: practices, crosscutting concepts, and core ideas. Washington, DC: The National Academies Press; 2012.
- [12] Dare EA, Ellis JA, Roehrig GH. Driven by beliefs: understanding challenges physical science teachers face when integrating engineering and physics. *J Pre-Coll Eng Educ* 2014;4(2):47–61.
- [13] Roehrig GH, Moore TJ, Wang HH, Park MS. Is adding the E enough? Investigating the impact of K-12 engineering standards on the implementation of STEM integration. *Sch Sci Math* 2012;112(1):31–44.
- [14] Shirey KL. How do we make this happen? Teacher challenges and productive resources for integrating engineering design into high-school physics dissertation. College Park: University of Maryland; 2017.
- [15] High School Program Innovation Planning Grant [Internet]. Richmond: Virginia Department of Education; 2015 [cited 2018 Mar 10]. Available from: http://www.doe.virginia.gov/news/news_releases/2015/innovation_planning_grants/global_stem_challenges_program.pdf.
- [16] Johnson K, Murphy S, O'Hara C, Shirey K. Four phases of the engineering design process in math and science classrooms. *Kaleidosc Educ Voices Perspect* 2015;1(2):19–24.